

Специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов

А. А. Донцов^{1,*}, И. А. Суторихин^{1,2}

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

*Контактный e-mail: alexdontsov@yandex.ru

Представлено описание специализированной геоинформационной системы автоматизированного мониторинга внутренних водоемов Сибири. Используются оптические и радарные данные дистанционного зондирования Земли, полученные с космических аппаратов Landsat-8, Sentinel-2 и Sentinel-1. Показаны архитектура ГИС, основные модули и компоненты. Приведены результаты применения этой системы в задачах определения динамики площади песчаных наносов в русле реки, оледенения водохранилища.

Ключевые слова: ГИС, мониторинг, спутниковая съемка, водные объекты, спектральные индексы, водные индексы, дешифрирование, автоматическое выделение воды, Landsat-8, Sentinel-2, Sentinel-1, NDWI, MNDWI, NDSI.

Введение

В последние десятилетия под влиянием глобальных и региональных изменений климата и воздействия антропогенных факторов на территории Российской Федерации наблюдаются значительные изменения состояния и гидрологического режима водных объектов. Фундаментальное значение для понимания и оценки степени воздействия климатических изменений и антропогенной деятельности на водные ресурсы имеют характеристики водоемов и водотоков, такие как площадь водного зеркала, уровень и объем воды, изменение площади песчаных наносов в руслах рек, а также процессы оледенения [1, 2]. В настоящее время для большинства регионов России проведение наземных измерений указанных характеристик не представляется возможным ввиду отсутствия стационарных пунктов наблюдения. В связи с этим актуальна задача разработки эффективных методов мониторинга параметров водных объектов по данным спутниковой съемки, являющейся, как правило, единственным источником объективной и оперативной информации об обширных и труднодоступных территориях страны.

Для изучения характеристик водных объектов широко используются архивные и оперативные данные, получаемые со спутников серии Landsat с периодичностью 16 дней. Пространственное разрешение мультиспектральной съемки, получаемой в настоящее время с космического аппарата Landsat-8, составляет 30 м. Начиная с 2016 г., на регулярной основе с периодичностью съемки в 10 дней стали доступны данные со спутника Sentinel-2A [3]. Второй спутник Sentinel-2B с аналогичными характеристиками

был запущен 7 марта 2017 г., что улучшит периодичность съемки до 5 дней. Разрешение снимков Sentinel-2 в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра 10 м. Более высокое разрешение позволяет производить мониторинг небольших по площади водоемов с большой точностью. Помимо данных оптического диапазона, актуально применение радиолокационных данных космических аппаратов Sentinel-1A/B, на борту спутников установлена радиолокационная аппаратура с синтезированной апертурой C-SAR, которая обеспечивает всепогодную, а также круглосуточную поставку космических снимков. Съемка выполняется в C-диапазоне (длина волны 6 см) [4, 5].

В работе рассматривается прототип автоматизированной сервис-ориентированной ГИС для мониторинга внутренних водоемов Сибири. Система строится на основе спутниковых данных с космических аппаратов Sentinel-1, Sentinel-2 и Landsat-8, получаемых из открытых архивов ESA (European Space Agency) и USGS (United States Geological Survey). Показаны результаты применения этой системы в задачах определения динамики песчаных наносов в русле реки и оледенения водохранилища.

1. Технологическая основа

На рис. 1 представлена структурная схема ГИС. Компоненты объединяет между собой платформа Django, которая позволяет реализовывать модульные Web-приложения.

Для работы с системой были разработаны Web-интерфейс и WMS/WPS-интерфейс для взаимодействия с настольными ГИС, такими как GRASS, QGIS и т. д. Также реализована возможность интеграции с системами наземного мониторинга водных объектов и сторонними сервисами геопространственных данных [6].

Рассмотрим основные модули ГИС. Ядро системы — модуль Application, реализующий связи между остальными компонентами и отвечающий за формирование панели администрирования, где можно установить координаты водоемов (точно или в виде полигона), для которых необходимо осуществлять мониторинг. Исходя из этих данных, менеджер задач формирует запросы на спутниковые снимки на требуемую территорию из архивов ESA и USGS. После получения и распаковки данных они передаются блоку тематической обработки [7].

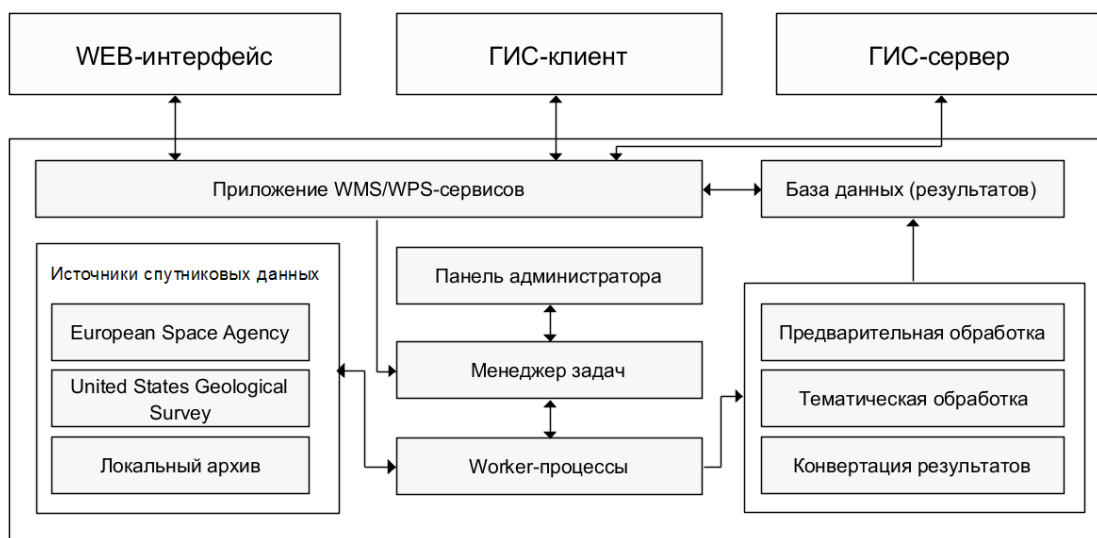


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой ГИС

Блок тематической обработки данных предназначен для работы с данными оптического диапазона и данными радиодиапазона. На этапе предварительной обработки данных оптического диапазона осуществляется атмосферная коррекция. Для ее реализации используется программный модуль, базирующийся на основе пакета Sen2Cor. Sen2Cor предназначен для генерации и форматирования продукта Sentinel-2 Level 2A и содержит систему атмосферной коррекции ATCOR. Она генерирует продукты уровня 2A и включает дополнительные функции, такие как создание карты классификации, обнаружение и удаление дымки перистых облаков, топографическая коррекция, теневая компенсация и т. д. [4, 8, 9]. Если отмеченный водный объект перекрывается маской облачности, то обработка снимка не проводится. С помощью предварительной маски воды определяются границы анализируемого водоема, на основе которых из целого изображения вырезается фрагмент, содержащий рассматриваемый водоем.

Модуль работы с данными радиодиапазона КА Sentinel-1 создан на основе программного пакета SNAP [5]. Основные функции этого модуля:

- Калибровка. Для правильной работы данные должны быть откалиброваны. Это особенно необходимо при подготовке данных для мозаик, где могут быть несколько продуктов на различных углах съемки и относительных уровнях яркости.
- Спекл-фильтрация изображений. Спекл-фильтры могут быть применены к данным для уменьшения количества спекл-шума.
- Корректировка по местности. Корректировка по местности геокодирует изображение, исправляя геометрические искажения с использованием цифровой модели высот (DEM), и производит продукт в картографической проекции.

После предварительной и тематической обработки осуществляется выделение водной поверхности при помощи (в случае с данными оптического диапазона) водных индексов, которые усиливают контраст между водной поверхностью и другими объектами, алгоритмов классификации ISODATA, Random Forest, Spectral Angle Mapper, K-means. Также блок тематической обработки включает в себя алгоритм пороговой сегментации по водным индексам и разработанный в ИВТ СО РАН алгоритм ECCA-Water [10, 11].

Полученные результаты в виде векторных полигонов в формате GeoJSON или Shapefile записываются в базу данных СУБД PostgreSQL [6, 7].

2. Примеры работы ГИС

2.1. Выделение водной поверхности и объектов на ней

Наиболее распространенными водными индексами являются нормализованный разностный водный индекс NDWI [12] и его модификация MNDWI [13]. Предполагается, что водным объектам соответствуют положительные значения этих индексов, а остальным — отрицательные. Индекс NDWI использует видимый зеленый (G) и ближний инфракрасный (NIR) каналы:

$$\text{NDWI} = \frac{G - \text{NIR}}{G + \text{NIR}}. \quad (1)$$

MNDWI использует канал SWIR (1.61 мкм) вместо канала NIR. Однако необходимо отметить, что для снимков Sentinel-2 канал SWIR (№ 11) имеет разрешение 20 м, что снижает пространственную точность результатов по сравнению с использованием NDWI.

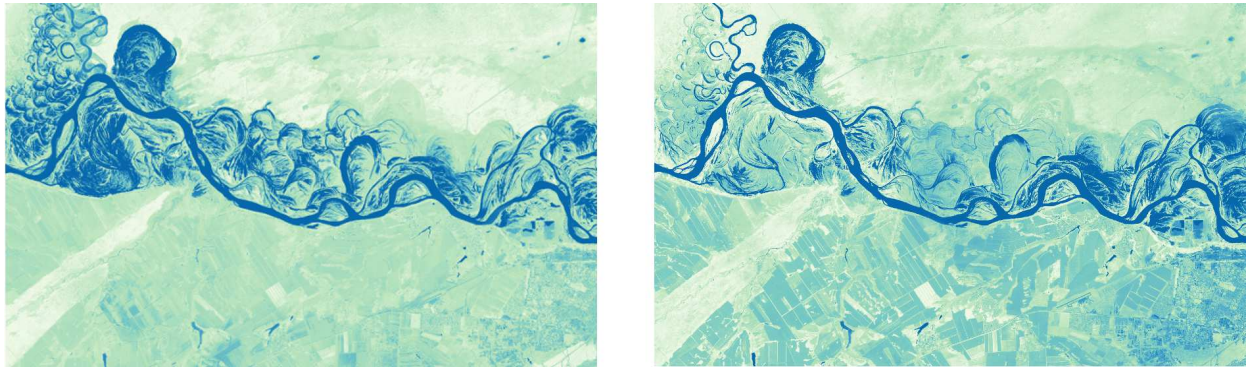


Рис. 2. Динамика паводковой обстановки на р. Оби, по данным Sentinel-2. Слева — 3 мая, справа — 25 мая 2017 г. вблизи г. Барнаула. Результат вычисления водного индекса NDWI

Третий используемый водный индекс строится как отношение значений в синем канале (B) и канале SWIR — $B/SWIR$. Предполагается, что для водных объектов значения этого индекса больше 1. Данный индекс был выбран, так как он используется для выделения воды при формировании продуктов Sentinel-2 уровня обработки 2A [4, 6]. На рис. 2 показана динамика паводковой обстановки на р. Оби вблизи г. Барнаула по данным Sentinel-2, результат вычисления NDWI. Темным цветом показаны русло р. Оби и затопленные водой области в пойме реки.

2.2. Определение динамики песчаных наносов в русле реки

Применение данных радиодиапазона позволяет обеспечить всепогодную, независимую от времени суток и атмосферных условий съемку. Области с гладкой поверхностью открытой воды легко детектируются на радарных изображениях. Водная поверхность действует как зеркальный отражатель, который рассеивает энергию радара в сторону от сенсора. Это приводит к относительно темным пикселям на изображениях, что контрастирует с неводными поверхностями. В сравнении с оптическими сенсорами радиолокационная съемка дает уникальную возможность обнаруживать стоячую воду под растительностью [14].



Рис. 3. Определение изменения площади песчаных наносов (осередков). Результат обработки данных Sentinel-1, к полученным снимкам применен алгоритм кластеризации K-means

Изучение закономерностей русловых процессов позволяет своевременно принимать меры (устройство струенаправляющих дамб, защитных сооружений и др.) по улучшению эксплуатации инженерных сооружений на реках (водозаборов, мостов, причалов, переходов через реки, трубопроводов и пр.), предвидеть будущие изменения русел рек при регулировании их стока водохранилищами и улучшать судоходные условия.

На рис. 3 представлен результат определения изменения площади песчаных наносов (осередков) по данным КА Sentinel-1A на р. Оби, вблизи с. Тальменки в период паводка 30.06.2016 – 07.07.2016 (*a–б*). Черным цветом показана динамика площади в указанный период (*в*).

2.3. Мониторинг оледенения водохранилища

Мониторинг процессов формирования и разрушения ледового покрова на реках и водоемах позволяет решать задачу прогнозирования масштабов прохождения паводков и образования ледовых заторов, для чего необходимы качественные прогнозы стоков рек. Это требует совершенствования системы получения и передачи оперативной информации о запасе воды и снега в речном бассейне в заинтересованные ведомства. Помимо наземных измерений и наблюдений важное значение здесь имеют данные дистанционного зондирования Земли, которые позволяют определять точное местоположение и протяженность ледового покрова и ледяных заторов, выявлять потенциально опасные участки русла, различные препятствия (острова, конусы выноса и т. п.), а также отслеживать начало ледостава и весеннего таяния.

Обязательным предварительным этапом при выявлении ледового покрова и открытой воды по снимку является создание векторной маски водных объектов, позволяющей ограничить область анализа и избежать тем самым некорректных результатов. Для этих целей проводится пороговая обработка NIR-канала летнего снимка исследуемого региона. Единственным проблемным объектом на изображении, затрудняющим классификацию, являются тени от облаков, имеющие сходную спектральную характеристику с водой [15].

Мультиспектральные данные позволяют производить классификацию поверхностей путем построения индексных изображений. Наиболее известный метод разделения пикселей снега (льда), воды и облаков — расчет нормализованного разностного индекса снега NDSI (Normalized Differenced Snow Index). Существует два варианта расчета NDSI [16]:

$$\text{NDSI}_{\text{SWIR}} = \frac{R - \text{SWIR}}{R + \text{SWIR}}, \quad (2)$$

$$\text{NDSI}_{\text{NIR}} = \frac{R - \text{NIR}}{R + \text{NIR}}, \quad (3)$$

где SWIR — значение сигнала в канале коротковолнового ИК-диапазона, NIR — значение сигнала в канале ближнего ИК-диапазона, R — значение сигнала в канале красного диапазона.

На рис. 4 представлен результат вычисления NDSI по данным Sentinel-2 для Новосибирского водохранилища. Видно, что до плотины ГЭС водохранилище покрыто льдом (значение индекса более 0.6), после плотины расположена полынья открытой воды (значение индекса 0–0.2).

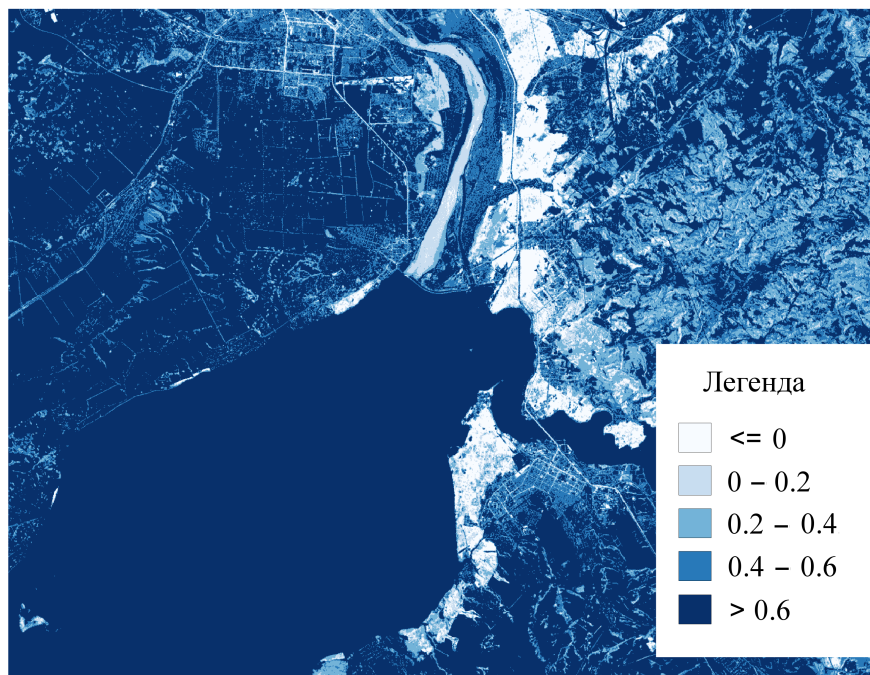


Рис. 4. Ледовая обстановка на Новосибирском водохранилище по данным Sentinel-2, 07.12.2016. Результат вычисления индекса $NDSI_{NIR}$

Таким образом, предложенная геоинформационная система позволяет производить регулярный мониторинг параметров внутриконтинентальных водных объектов по данным оптической и радиолокационной спутниковой съемки с космических аппаратов Sentinel-2, Landsat-8 и Sentinel-1. Указанная система может быть использована для решения прикладных и фундаментальных задач гидрологии внутриконтинентальных водных ресурсов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (грант № 0316-2015-0006).

Список литературы / References

- [1] Crétau, J.-F., Jelinski, W., Calmant, S. et al. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data // *Advances in Space Res.* 2011. Vol. 47, No. 9. P. 1497–1507.
- [2] Курганович К.А., Носкова Е.В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // *Вестн. Забайкальского гос. ун-та.* 2015. № 6(121). С. 16–24.
Kurganovich, K.A., Noskova, E.V. The estimation of water surface variations of steppe soda lakes in the southeast of transbaikalie with using of remote sensing of water indices // *Bulletin of Transbaikalian State Univ.* 2015. No. 6(121). P. 16–24. (In Russ.)
- [3] Sentinels Scientific Data Hub. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> (accessed 30.03.2017).
- [4] Sentinel-2 MSI. Technical guide. Level-2A algorithm overview. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm> (accessed 30.03.2017).

- [5] Sentinel-1 SAR. User guide. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar> (accessed 20.03.2017).
- [6] **Донцов А.А., Волков Н.В., Лагутин А.А.** Региональная геоинформационная система оперативного космического мониторинга // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2015. № 8(6). С. 763–768.
Dontsov, A.A., Volkov, N.V., Lagutin, A.A. The regional geoinformation remote sensing system // Journal SibFU. Engineering and Technologies. 2015. No. 8(6). P. 763–768. (In Russ.)
- [7] **Донцов А.А., Суторихин И.А.** Определение площади акватории озер по данным дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий // Естественные и технические науки. 2016. № 11(101). С. 106–109.
Dontsov, A.A., Sutorikhin, I.A. Measuring of lake surface area using remote Earth sensing data and GIS technologies // Natural and Technical Sci. 2016. No. 11(101). P. 106–109. (In Russ.)
- [8] Sen2Cor. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor> (accessed 21.03.2017).
- [9] ATCOR-4. User guide. Available at: http://www.rese.ch/pdf/atcor4_manual.pdf (accessed 22.03.2017).
- [10] **Синявский Ю.Н., Пестунов И.А., Дубровская О.А. и др.** Методы и технология сегментации мультиспектральных изображений высокого разрешения для исследования природных и антропогенных объектов // Вычисл. технологии. 2016. Т 21, № 1. С. 127–140.
Sinyavskiy, Y.N., Pestunov, I.A., Dubrovskaya, O.A. et al. Methods and technology for segmentation of images with high spatial resolution for studies of nature and man-made objects // Comput. Technologies. 2016. Vol. 21, No. 1. P. 127–140. (In Russ.)
- [11] **Pestunov, I.A., Berikov, V.B., Kulikova, E.A., Rylov, S.A.** Ensemble of clustering algorithms for large datasets // Optoelectronics, Instrument. and Data Proc. 2011. Vol. 47, No. 3. P. 245–252.
- [12] **McFeeters, S.K.** The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425–1432.
- [13] **Xu, H.** Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033.
- [14] **Родионова Н.В.** Анализ изображений Sentinel-1 для весеннего паводка в Алтайском крае в апреле 2015 года и Рязанской области в апреле 2016 года // Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. № 1(14). С. 136–146.
Rodionova, N.V. Image analysis of Sentinel-1 for flood detection in Altai Region in April 2015 and Ryazan Region in April 2016 // Sovr. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2017. No. 1(14). С. 136–146. (In Russ.)
- [15] **Аншаков Г.П., Журавель Ю.Н., Ращупкин А.В.** Использование мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования для автоматизированного мониторинга рек и водоемов в весенний период // Компьютерная оптика. 2015. № 2(39). С. 224–233.
Anshakov, G.P., Zhuravel, Y.N., Raschupkin, A.V. Using multi- and hyperspectral remote sensing data for automated river and reservoir monitoring during spring // Computer Optics. 2015. No. 2(39). С. 224–233. (In Russ.)
- [16] **Hall, D.K., Riggs, G.A.** Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Springer, 2014. P. 779–780.

*Поступила в редакцию 10 апреля 2017 г.,
с доработки — 4 октября 2017 г.*

Specialized geoinformation system for automated monitoring of rivers and reservoirs

DONTSOV, ALEXANDER A.^{1,*}, SUTORIKHIN, IGOR A.^{1,2}

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, 656038, Russia

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

*Corresponding author: Dontsov, Alexander A., e-mail: alexdontsov@yandex.ru

In recent decades, significant changes in the state and hydrological regime of water bodies have been observed under the influence of global and regional changes in the climate system and the impact of anthropogenic factors on the territory of the Russian Federation. It is known that the characteristics of reservoirs and watercourses, such as the area of water surface, the level and volume of water, the change in the area of sand deposits in river beds, and the processes of glaciation, are of fundamental importance for understanding and assessing the degree of impact of climate change and anthropogenic activity on water resources.

This work provides description of a specialized geo informational system (GIS) for automated monitoring of the Siberian internal water bodies. It uses optical and radar remote Earth sensing data from Landsat-8, Sentinel-1, and Sentinel-2 spacecrafts. It also demonstrates GIS architecture, core modules and features. The technological features of the system, the sequence of processing and visualization of satellite data are presented. The proposed solution is a specialized content management system for website, which takes into account the specificity of GIS web applications. The paper presents the results for this system usage to track area dynamics of sand deposits in riverbeds, ice surface on water reservoirs and flood assessment.

This system can be used to solve applied and fundamental tasks of hydrology of inland water resources.

Keywords: Sentinel-2, satellite images, NDWI, MNDWI, GIS, monitoring, water bodies, lakes, water surface area, water indices, automatic water extraction.

Acknowledgements. The work was supported by the Presidium of the RAS (grant № 0316-2015-0006).

Received 10 April 2017

Received in revised form 4 October 2017